

WMO空间计划与风云气象卫星的国际化发展趋势

张鹏^{1,2} 杨军^{1,2} 关敏^{1,2} 徐喆^{1,2} 王劲松^{1,2}

(1 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室/国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心), 北京 100081; 2 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081)

摘要: 经过50年的发展, 我国不仅成为世界上少数几个同时拥有极轨和静止轨道气象卫星的国家, 风云卫星还开放共享数据, 成为全球空间观测系统的重要组成部分。自主可控的国产化道路和开放合作的国际化道路是风云卫星高质量发展的双翼, 本文结合世界气象组织(WMO)2009年发布的全球观测系统(GOS)2025年远景规划, 重点回顾了进入新世纪之后我国风云气象卫星全面接轨国际对地观测系统的历程。对标WMO 2019年发布的全球综合观测系统(WIGOS)2040年远景规划, 探讨了我国气象卫星未来应该把握的发展方向和重点关注的技术趋势。

关键词: 风云气象卫星, 全球观测系统, 远景规划

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.05.008

WMO Space Program and Internationalization of FengYun Meteorological Satellites

Zhang Peng^{1,2}, Yang Jun^{1,2}, Guan Min^{1,2}, Xu Zhe^{1,2}, Wang Jinsong^{1,2}

(1 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Centre (National Center for Space Weather), China Meteorological Administration, Beijing 100081
2 Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite)

Abstract: After 50 years of development, China has become one of the few countries that maintain both polar and geostationary meteorological satellites operationally in the world. China's FengYun (FY) Meteorological Satellites data are shared globally and open to global users for free, therefore FY satellites system has become a key component of the WMO space observation program. There exist two wings leading to the high-quality development of FY meteorological satellites, the independent and controllable localization path, and the open and cooperative internationalization path. This paper focuses on reviewing the integration process of China's FY meteorological satellite with the international earth observation system after entering a new era, responding to the Vision Plan 2025 of the Global Observation System (GOS) released by WMO in 2009. Based on the Vision Plan 2040 of the WMO Global Integrated Observing System (WIGOS) released in 2019, the future development direction and technical trends of China's FY meteorological satellites are discussed as well.

Keywords: FengYun Meteorological Satellites, Global Observation System, Vision Plan

0 引言

1957年10月, 前苏联发射了人类历史上首颗人造卫星Sputnik。两年半之后, 美国将人造卫星技术应用于气象观测。1960年4月, 人类历史上首颗气象卫星泰罗斯一号(TIROS-1)成功发射, 揭开了从空间进行气象观测的新纪元^[1]。随后, 美国开展了密集的气象卫星研制、发射、科学试验和业务应用, 1960—1965年发射了10颗试验性泰罗斯卫星, 1966—1969年发射了9颗泰罗斯业务气象卫星TOS, 1964—1978年发射了8颗雨云科学试验卫星Nimbus, 奠定了全球观测系统

的技术基础。1966年, 美国又成功发射了首颗地球静止应用技术卫星ATS-1, 形成了当前太阳准同步极地轨道卫星(简称极轨气象卫星)和地球同步静止轨道卫星(简称静止气象卫星)两个业务系列的气象业务卫星发展的大格局^[2]。

美国极轨业务气象卫星的发展经历了5代, 1970—1978年共发射了第二代5颗卫星, 1978—1998年共发射了第三代10颗卫星, 卫星观测能力从可见光云图拓展到微波大气探测, 气象卫星应用从定性走向定量。1998—2009年发了第四代5颗卫星, 增加了夜间观测并提升了大气探测能力。2011年发射的SNPP卫星开启了美国新一代联合极轨卫星系统(JPSS), 实现了地球大气全天候多要素的三维综合探测。2019年发射的JPSS-1(重新命名为NOAA-20)是目前美国极

收稿日期: 2022年8月15日; 修回日期: 2022年9月2日

第一作者: 张鹏(1970—), Email: zhangp@cma.gov.cn

资助信息: 风云三号03批气象卫星工程

轨主业务卫星。美国静止业务气象卫星发展了4代。1975—1978年发射了第一代3颗静止气象卫星(GOSE-1—GOSE-3),实现了可见光及红外成像;1980年,第二代静止气象卫星首发星(GOSE-4)升空,其大气探测系统实现了静止轨道大气探测;1994—2001年,第三代静止轨道业务气象卫星投入使用(GOSE-8—GOSE-12),卫星观测时间分辨率极大提升;2006年,第四代静止气象卫星首发星发射,目前GOES-16和GOES-17作为东西业务卫星在轨业务运行,2022年3月发射的GOES-18计划于2023年初替代GOES-17。

欧洲气象卫星的发展始于静止气象卫星。1977年欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)发射了第一颗静止气象卫星Meteosat-1,成功获取到全球第一幅水汽图像,Meteosat-1~Meteosat-7组成欧洲第一代静止气象卫星MFG;欧洲第二代业务静止气象卫星MSG(Meteosat-8~Meteosat-11)从2002年开始使用,自2018年2月起,Meteosat-11在0°赤道上空业务运行,Meteosat-10在9.5°E提供5分钟快速扫描服务。欧洲极轨业务气象卫星起步虽晚,但技术起点高,2006年欧洲气象卫星组织发射了第一颗极轨气象卫星METOP-A,METOP系列卫星独具特色的红外大气干涉探测器(IASI),以及GPS掩星探测器(GPS-S)和散射计(ASCAT),在全球对地观测系统中发挥了很好的作用^[3]。

20世纪80年代到21世纪初,我国业务和科研中使用较多的还有日本气象厅(JMA)发展的葵花系列(Himawari)通信和气象静止卫星。1977—1995年发射了5颗第一代葵花卫星,一直运行到2003年;2005—2006年,2颗第二代葵花卫星(也称MTSAT-1R、MTSAT-2)连续发射,姿态控制改进为三轴稳定,云图成像时间大幅缩短,图像品质提高。2014年和2016年发射的葵花8号、9号(Himawari-8/-9),其先进成像仪(AHI)扫描全圆盘图时间小于10 min,可见光分辨率最高可达0.5 km。

前苏联和俄罗斯水文气象局(RosHydroMet)从1969年开始发射流星系列(Meteor)极轨气象卫星,至今已发展了3代,共计59颗;目前在轨业务运行2颗静止气象卫星电子系列(Electro);2021年发射了第一颗椭圆轨道北极系列(Arctica-M N1)气象卫星。此外,印度气象局(IMD)发展的静止通信和气象卫星(INSAT),以及韩国气象局(KMA)2010年开始发展的静止通信、海洋和气象卫星(COMS)也是世界气象组织(WMO)全球观测业务卫星的组成部分。除了欧美的气象卫星,其他国家的气象卫星在某些方面具有各自的特点和优势,但是从星座的完备性、观测的多

样性、业务的稳定性、数据的可获取性等综合评估而言,同风云卫星尚存在不同程度的差距。

自TIROS-1开始,气象卫星云图就开始在台风、暴雨、强对流等高影响天气监测和预报中发挥独特和不可替代的作用。到20世纪80年代初,卫星遥感的科学家们已经初步发展了覆盖大气、陆地、海洋等多种产品的反演算法和定量遥感产品,在气候、环境、自然灾害的监测和评估中发挥了重要的作用。进入20世纪90年代,英国科学家Eyer率先在变分同化的框架内,对气象卫星辐射观测资料进行了直接同化,成为气象卫星资料定量应用的重要里程碑^[4-5]。截至目前,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)所使用的卫星资料的数量已经超过资料总量的95%,能业务同化的卫星种类接近100种,把气象卫星遥感的大气信息作为初值输入数值预报模式弥补常规观测的不足,成为提高模式预报精度和延长预报时效的重要手段。除气象领域外,气象卫星图像资料和产品在农业、国防等多个领域为国家经济发展和社会进步做出了贡献^[6-9]。

1 风云卫星发展的国际化道路

1969年,为了改变我国在气象防灾减灾领域的落后面貌,周恩来总理提出“一定要搞我们自己的气象卫星”。从1970年开始独立自主研制风云卫星,到1988年9月7日第一颗气象卫星成功发射,历经卫星研制、在轨试验、业务化稳定运行、业务升级换代四个阶段,目前我国已经成功研制和发射了两代四型19颗风云系列气象卫星、7颗在轨运行。我国成为世界上少数几个同时拥有极轨和静止轨道气象卫星的国家;风云卫星还开放共享数据,成为WMO空间观测系统的重要组成部分^[10]。

由于用极地轨道获取全球资料和用静止轨道获取高频次资料对于天气观测的互补优势,我国在气象卫星发展初期即提出同时发展极轨和静止两个系列的气象卫星。1999年5月发射的风云一号C卫星FY-1C和2004年10月发射的风云二号C卫星FY-2C分别实现了我国极轨和静止两个系列气象卫星的业务化稳定运行,2008年5月风云三号A卫星FY-3A和2016年12月风云四号A卫星FY-4A成功发射,我国全面完成了第二代极轨和静止气象卫星的升级换代^[11]。

2009年,WMO发布了全球观测系统(GOS)2025年远景规划,根据全球数值天气预报发展的需求,提出了极轨气象卫星上午、下午、黎明三星组网(图1)和静止气象卫星等60经度均匀布局六星组网(图2)的全球空基观测系统基本框架^[12]。在充分考虑我国气象业务和大气科学研究需求基础上,根据国际气象卫

星发展大格局，中国气象局提出我国第二个气象卫星发展规划，即《我国气象卫星及其应用发展规划（2011—2020年）》。在该规划支持下，2018年6月风云二号H卫星FY-2H（即“一带一路星”）和2021年7月风云三号E卫星FY-3E（即“黎明星”）先后成功发射，完成了静止卫星印度洋上空观测和极轨卫星黎明时刻观测的业务布局，不仅改进完善了我国风云气象卫星的业务布局，还丰富补充了全球对地观测系统的业务框架。

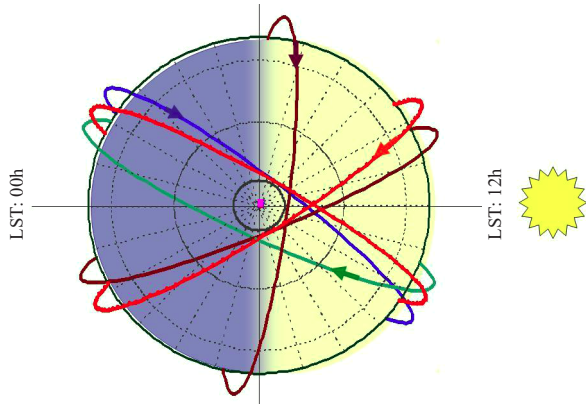


图1 WMO提出的极轨卫星上午、下午、黎明卫星三星组网布局示意图(来源:WMO)

Fig. 1 Schematic layout of the network of polar-orbiting satellites AM, PM and EM proposed by WMO (quoted from WMO)

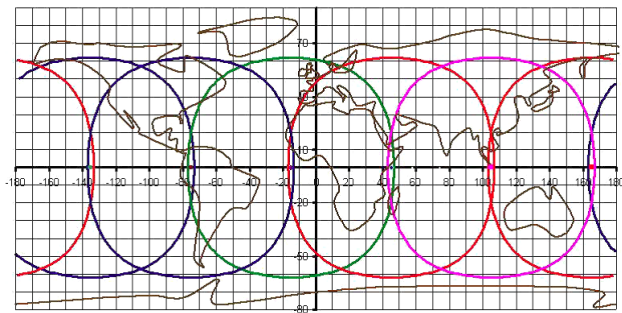


图2 WMO提出的静止卫星等60经度均匀布局六星组网布局示意图(来源:WMO)

Fig. 2 Network layout of six geostationary satellites proposed by WMO (quoted from WMO)

2 风云卫星的现状与水平

2.1 风云卫星的现状

我国风云气象卫星发展历经五十余年，在我国民用遥感卫星领域成为重要的空间基础设施，是气象现代化的重要标志，取得了举世瞩目的成就。风云卫星发展历经了卫星研制、在轨试验、业务化稳定运行、业务升级换代四个阶段。卫星研制阶段，重点突破卫星和遥感仪器的研制技术，1977年，中国科学院上海技术物理研究所研制出了两通道（可见光和红外）扫

描辐射计样机，并进行了航空校飞试验。在轨试验阶段，对卫星、运载、发射场、测控和地面五大系统进行全面测试验证，重点解决有无问题，受到当时研制技术和经验的制约，我国第一和二颗极轨卫星FY-1A和FY-1B由于三轴稳定姿态控制方面的问题分别仅运行了39 d和158 d。第一颗静止卫星FY-2A由于消旋天线故障仅运行了6个月，第二颗静止卫星FY-2B解决了天线消旋失锁问题，但卫星在轨运行8个月时，由于上变频本振源双机故障，卫星失去了云图传输功能。虽然这些卫星没有达到设计寿命，但对这些故障的分析和解决为我国气象卫星长寿命发展和长期运行管理积累了有益经验。第三阶段聚焦卫星的业务化稳定运行，自1999年发射的FY-1C和2004年发射的FY-2C，风云卫星突破了长寿命稳定运行的技术瓶颈，开始提供长期连续的业务观测资料。第四阶段聚焦卫星的升级换代，自2008年发射的FY-3A和2016年发射的FY-4A，我国逐步完成了极轨和静止卫星的升级换代，星上装载了光学成像、大气探测、微波成像、高光谱痕量气体探测和全波段地球能量收支测量等多种类型的遥感仪器，揭开了风云卫星地球观测的新篇章。表1给出了截止到2022年6月已经发射的风云气象卫星情况，表2给出了已经发射的遥感仪器列表，表3和表4分别给出了当前在轨风云极轨、静止气象卫星和遥感仪器工作状态。

风云气象卫星正在进入高质量发展的阶段，新阶段一是更加注重遥感仪器定量观测品质，特别在图像

表1 截止到2022年6月已经发射的风云气象卫星
Table 1 FengYun satellites launched by June 2022

卫星名称	卫星类型	发射时间	卫星功能和状态
FY-1A	极轨	1988年9月7日	研发卫星，退役
FY-1B	极轨	1990年9月3日	研发卫星，退役
FY-1C	极轨	1999年5月10日	业务卫星，退役
FY-1D	极轨	2002年5月15日	业务卫星，退役
FY-3A	极轨	2008年5月27日	研发卫星，退役
FY-3B	极轨	2010年11月5日	研发卫星，退役
FY-3C	极轨	2013年9月23日	业务卫星，在轨运行
FY-3D	极轨	2017年11月15日	业务卫星，在轨运行
FY-3E	极轨	2021年7月5日	业务卫星，在轨运行
FY-2A	静止	1997年6月10日	研发卫星，退役
FY-2B	静止	2000年6月25日	研发卫星，退役
FY-2C	静止	2004年10月18日	业务卫星，退役
FY-2D	静止	2006年12月8日	业务卫星，退役
FY-2E	静止	2008年12月23日	业务卫星，退役
FY-2F	静止	2012年1月13日	业务卫星，退役
FY-2G	静止	2014年12月31日	业务卫星，在轨运行
FY-2H	静止	2018年6月5日	业务卫星，在轨运行
FY-4A	静止	2016年12月11日	研发卫星，在轨运行
FY-4B	静止	2021年6月3日	业务卫星，在轨运行

表2 截止到2022年6月已经发射的遥感仪器列表及其研制单位
Table 2 List of remote sensing instruments in orbit and their manufacturers by June 2022

仪器中文名称	仪器英文简称	装载的卫星平台	研制单位
可见光近红外扫描辐射计	VIRR	FY-1A, FY-1B, FY-1C, FY-1D, FY-3A, FY-3B, FY-3C	上海技术物理研究所
可见光近红外自旋式扫描辐射计	VISSR	FY-2A, FY-2B, FY-2C, FY-2D, FY-2E, FY-2F, FY-2G, FY-2H	上海技术物理研究所
中分辨率光谱成像仪	MERSI	FY-3A, FY-3B, FY-3C, FY-3D, FY-3E	上海技术物理研究所
红外分光计	IRAS	FY-3A, FY-3B, FY-3C	上海技术物理研究所
微波成像仪	MWRI	FY-3A, FY-3B, FY-3C, FY-3D	上海航天测控通信研究所
微波温度计	MWTS	FY-3A, FY-3B, FY-3C, FY-3D, FY-3E	中国航天科技集团五院西安分院
微波湿度计	MWHS	FY-3A, FY-3B, FY-3C, FY-3D, FY-3E	国家空间科学中心
红外高光谱大气探测仪	HIRAS	FY-3D, FY-3E	上海技术物理研究所
高光谱温室气体监测仪	GAS	FY-3D	北京空间机电研究所
全球导航卫星掩星探测仪	GNOS	FY-3C, FY-3D, FY-3E	国家空间科学中心
风场测量雷达	WindRAD	FY-3E	中国航天科技集团五院西安分院
紫外臭氧总量探测仪	TOU	FY-3A, FY-3B, FY-3C	国家空间科学中心
紫外臭氧垂直探测仪	SBUS	FY-3A, FY-3B, FY-3C	长春光学精密机械与物理研究所
地球辐射监测仪	ERM	FY-3A, FY-3B, FY-3C	上海技术物理研究所
太阳辐射监测仪	SIM	FY-3A, FY-3B, FY-3C, FY-3E	长春光学精密机械与物理研究所
太阳辐射度监测仪	SSIM	FY-3E	长春光学精密机械与物理研究所
太阳XEUUV成像仪	X-EUVI	FY-3E	长春光学精密机械与物理研究所
空间环境监测仪	SEM	FY-1A, FY-1B, FY-1C, FY-1D, FY-3A, FY-3B, FY-3C, FY-3D, FY-3E	国家空间科学中心
广角极光成像仪	WAI	FY-3D	长春光学精密机械与物理研究所
电离层光度计	IPM	FY-3D	国家空间科学中心
多角度电离层光度计	Tri-IPM	FY-3E	国家空间科学中心
先进的静止轨道辐射成像仪	AGRI	FY-4A, FY-4B	上海技术物理研究所
静止轨道干涉式红外探测仪	GIIRS	FY-4A, FY-4B	上海技术物理研究所
闪电成像仪	LMI	FY-4A	北京空间机电研究所
快速成像仪	GHI	FY-4B	上海技术物理研究所
空间环境监测仪器包	SEP	FY-4A, FY-4B	国家空间科学中心

表3 截止到2022年6月在轨风云极轨气象卫星和遥感仪器工作状态

Table 3 Operating status of FengYun polar orbiting meteorological satellites and their remote sensing instruments in orbit by June 2022

卫星	状态	轨道	遥感仪器状态			
FY-3C	受限业务运行	上午	MERSI-I	VIRR	MWTS-II	MWHS-II
			MWRI-I	IRAS	TOU	SBUS
			SIM-I	ERM-I	GNOS-I	SEM
FY-3D	业务运行	下午	MERSI-II	HIRAS-I	MWTS-II	MWHS-II
			MWRI-I	GAS	WAI	IPM
			GNOS-I	SEM		
FY-3E	业务运行	黎明	MERSI-LL	HIRAS-II	MWTS-III	MWHS-II
			GNOS-II	WindRAD	SSIM	SIM-II
			X-EUVI	Tri-IPM	SEM	

注：表中绿色阴影表示仪器工作状态正常，红色表示仪器失效关机，蓝色表示仪器受限关机，黄色表示仪器受限运行。

导航定位和辐射测量定标方面不断取得新的进展，风云卫星要成为精密监测的标杆，全面支撑定量遥感和卫星资料同化应用；二是更加注重定量遥感应用，要在遥感应用体系框架下推进国省两级遥感应用的广度

表4 截止到2022年6月在轨风云静止气象卫星和遥感仪器工作状态

Table 4 Operating status of FengYun geostationary meteorological satellites and their remote sensing instruments in orbit by June 2022

卫星	状态	位置	遥感仪器状态			
FY-2G	业务运行	99.5°E	VISSR	SEM		
FY-2H	业务运行	79°E	VISSR	SEM		
FY-4A	业务运行	105°E	AGRI	GIIRS	LMI	SEP
FY-4B	业务运行	133°E	AGRI	GIIRS	GHI	SEP

注：表中绿色阴影表示仪器工作状态正常。

和在气象预报预测核心业务应用的深度，同时也要充分利用高校、科研院所、国际社会力量，不断提升风云卫星遥感应用的科学技术水平。

2.2 风云卫星的水平

进入21世纪以来，风云气象卫星进入快速发展阶段。随着《“九五”后两年至2010年我国气象卫星及其应用发展计划》和《我国气象卫星及其应用发展规划（2011—2020年）》的先后实施，我国在2000—2018

年共计成功发射了15颗风云气象卫星(表1)。表5给出了我国气象卫星同美国首颗同类气象卫星业务化程度的比较,整体来看,我国首颗极轨、静止气象卫星分别比美国晚了28 a和31 a,约有30 a的差距;我国首颗业务极轨、业务静止气象卫星分别比美国晚了21 a和29 a,约有20 a的差距;我国新一代极轨、静止气象卫星均与美国同期发射。

表5 风云卫星同美国卫星业务化时间比较

Table 5 Comparison of operational time between FengYun satellites and American meteorological satellites

	卫星水平		
	美国	中国	差距
首颗卫星	1959年(Vanguard 2)	1970年(东方红DFH-1)	11 a
首颗极轨气象卫星	1960年(TIROS-1)	1988年(FY-1A)	约30 a
首颗静止气象卫星	1966年(ATS)	1997年(FY-2A)	
首颗业务极轨气象卫星	1978年(TIROS-N)	1999年(FY-1C)	约20 a
首颗业务静止气象卫星	1975年(GOES-1)	2004年(FY-2C)	
新一代极轨气象卫星	2017年11月(JPSS-1)	2017年11月(FY-3D)	相当
新一代静止气象卫星	2016年11月(GOES-R)	2016年12月(FY-4A)	

表6给出了在轨风云卫星同国际同类卫星在探测能力、探测精度和探测产品等功能和性能指标的综合比较。随着2008年成功发射的FY-3A卫星实现了极轨卫星的升级换代,星上装载了10台遥感仪器,光谱覆盖紫外、可见近红外、红外和微波波段,同时完成光学成像、红外-微波联合大气探测、微波成像、窄光谱大气成分探测、全谱段地球能量监测等5大类功能,实现了全球、三维、定量和多光谱的全天候综合观测^[13]。2016年成功发射的FY-4A卫星装载了三台先进的对地遥感仪器,其中光学成像仪AGRI和闪电成像仪LMI功能指标达到同期美国新一代静止卫星GOES-R的水平,干涉式红外大气探测仪GIIRS是目前国际上唯一一台在静止轨道开展高光谱大气垂直探测的仪器^[14-15]。

表6 在轨风云卫星同国际同类卫星性能比较

Table 6 Performance comparison between FengYun satellites and similar international satellites

功能/性能	内容	风云卫星	欧、美、日卫星
探测能力	全球数据接收能力	南北极布局	南北极布局
	全球数据获取时效	2 h	美国: 2 h 欧洲: 2.25 h 日本: 无
	区域观测能力	优于5 min级	优于5 min级
	综合探测能力	全谱段、多要素	全谱段、多要素
探测精度	可见光定标误差	5%	3%
	红外与微波定标误差	0.4 K	0.2 K
		0.8 K	0.4 K
探测产品	大气-陆地-海洋-空间天气产品体系	完整但缺少产品精度信息	美国: 完整 欧洲: 完整 日本: 部分

在卫星观测能力大幅提升的同时,风云卫星的资料接收和处理的核心关键技术也得到了极大的提升。2010年建成瑞典基律纳北极接收站并投入使用,2018年租用挪威Troll南极接收站并投入使用,确保风云卫星在全球任意地方的观测资料均可在2小时内完成接收、回传、处理和服务。在实现了卫星连续稳定观测的同时,卫星资料的定位定标处理技术也获得了长足的进步^[8, 10]。经过风云一号系列、风云二号系列、风云三号A星和B星、风云四号A星等多颗卫星的实践,通过分析卫星从空间观测地球的几何原理和辐射从观测目标发出到被卫星传感器接收的传递过程,用严格的物理概念和数学模型进行图像定位、数据定标,卫星的遥感仪器级(即1级)产品处理技术已经有了大幅提高和改进。精确轨道计算和仪器观测几何求解使定位精度在全球任一区域均达到像元级,中国遥感辐射校正场CRCS、全球伪不变定标场PICS、深对流卷云DCC、月亮等不同亮度自然稳定目标的联合使用可以有效订正在轨遥感仪器的非线性效应,目前风云卫星遥感仪器的辐射定标精度可见近红外可以达到5%、红外达到0.4 K、微波达到0.8 K,全面同化进入我国和欧洲的数值天气预报模式^[16-17]。

在我国,风云卫星为2500多家用户提供100多种卫星资料和产品^[18]。在国际上,风云卫星已被WMO纳入全球业务应用气象卫星序列,同时也是空间与重大灾害国际宪章机制下的值班卫星,为超过120个国家和地区提供服务。风云卫星提供用户直收、CMACast广播转发、门户网站注册下载、人工定制等多种方式的数据服务,科学用户可以在线访问(<http://satellite.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>)和下载数据。

3 WIGOS 2025年发展远景下的风云卫星发展

2009年6月,WMO执行理事会第61届会议(EC-61)正式批准了全球观测系统(GOS)2025年远景规划。该远景规划提供了指导全球观测系统至2025年发展的目标^[12]。在全球综合观测系统WIGOS框架下,GOS作为WIGOS的核心组成部分,包括空基观测系统和地基观测系统,提供全面而综合的观测资料,满足WMO所有成员国对观测不断提升的需求,并追求可靠、稳定、持续和符合成本效益的发展方式。其中空基观测系统依赖于有卫星计划的成员国及其航天团体的发展计划,以及卫星运行国和航天伙伴机构之间的协调合作,如气象卫星协调组织(CGMS)、卫星对地观测委员会(CEOS)来实现。

GOS 2025年远景规划中明确提出极地太阳同步轨

道卫星要运行在晨昏、上午、下午三个轨道面内，且给出了静止轨道、极地轨道和高倾角大椭圆轨道卫星上仪器配置建议。其空基观测系统需满足的具体要求如下：

1) 业务运行的静止轨道卫星至少6颗，相隔经度不超过70°。遥感仪器包括高分辨率多光谱可见光/红外成像仪、红外高光谱探测仪和闪电成像仪。

2) 极地太阳同步轨道卫星运行在三个轨道平面内，交点地方时分别为13:30、17:30、21:30左右。遥感仪器包括红外高光谱探测仪、微波探测仪、高分辨率多光谱可见光/红外成像仪。

3) 适当轨道上的其他业务任务（经典极地轨道、地球静止轨道等）。遥感仪器包括微波成像仪、散射计、无线电掩星探测仪、测高计、红外双角度成像仪、窄波段高光谱可见近红外成像仪、高分辨率多光谱可见光/红外成像仪、降水测量雷达、地球辐射收支探测仪、太阳辐射监测仪、大气成分仪器、合成孔径雷达。

4) 业务探索和技术示范的仪器，包括极地轨道卫星上的多普勒测风雷达、低频微波辐射计，静止轨道卫星上的微波成像仪/探测仪、高分辨率多光谱窄带可见近红外CCD成像仪，高倾角大椭圆轨道卫星上的可见光/红外成像仪，重力测量任务。

5) 极地轨道和静止轨道卫星上的空间天气仪器，包括太阳成像仪、粒子探测器、电子密度探测器。

2012年12月，《我国气象卫星及其应用发展规划（2011—2020年）》（以下简称2020年规划）由中国气象局正式发布^[19]。该规划明确了2011—2020年我国气象卫星及应用的发展目标和任务。2020年规划中风云三号极轨气象卫星按照上午星、下午星和降水测量雷达星三星组网运行。风云三号上午星，降交点地方时为10:00，升交点地方时为22:00，以地球表面成像观测和大气物理参量定量遥感为主，探测数据主要用于天气预报、生态、环境、灾害监测业务及研究。遥感仪器主要包括中分辨率光谱成像仪、微波温度计、微波湿度计、红外高光谱大气探测仪、风场散射计、全球导航卫星掩星探测仪、地球辐射收支仪和空间环境探测器等。卫星计划发射3颗。风云三号下午星，升交点地方时为14:00，以大气物理参量定量探测和气候变化监测为主，探测数据主要用于天气预报、大气化学和气候变化监测业务及研究等方面。遥感仪器主要包括中分辨率光谱成像仪、微波成像仪、微波温度计、微波湿度计、红外高光谱大气探测仪、近红外高光谱温室气体监测仪、紫外可见高光谱探测仪、全球

导航卫星掩星探测仪和空间环境监测器等。卫星计划发射2颗。降水测量雷达卫星，以全球降水分布及强度监测为主，探测数据主要用于强降水等灾害性天气监测，以及全球水汽分布监测。遥感仪器包括降水测量雷达、可见光红外扫描辐射计和微波辐射计等^[20]。降水测量卫星计划发射1颗。风云四号静止气象卫星光学星配置多通道扫描辐射计、干涉式大气垂直探测仪、闪电成像仪和太阳X射线成像仪，按照东、西轨道位置布局，采用双星业务运行模式，计划发射2颗。2020年规划在保证我国气象应用需求的基础上，积极响应和支撑了GOS 2025年远景规划。

2011年气象卫星协调组织CGMS在分析了各国卫星计划后，指出极轨卫星晨昏轨道观测、静止卫星印度洋上空观测依然是全球观测布局的空白和薄弱环节。为了响应WMO优化当前极轨卫星观测系统的要求，发展和完善GOS 2025年远景规划中极轨卫星三星组网的业务设计，2012年在CGMS第40届大会上，中国气象局报告了风云三号极轨卫星从上午轨道转移到晨昏轨道的可行性，表示将继续探索在风云三号后续计划上发展晨昏轨道的可能性。2013年4月25—26日，WMO和中国气象局在北京主持召开晨昏轨道虎组（Tiger Team）工作会议，对晨昏轨道卫星应用效益进行了系统性的分析研究，形成了应用效益评估报告，结果表明：晨昏轨道卫星观测对全球数值天气预报有积极贡献^[21]。2013年6月在WMO理事会上，中国气象局明确了发展晨昏轨道卫星的态度。

此后，中国气象局经过多次论证，确定了将2020年规划中的一颗风云三号上午星调整为晨昏轨道卫星的方案，并初步确定了风云三号晨昏轨道卫星的优先配置仪器。2014年1月7日，国家卫星气象中心在北京组织召开了风云三号晨昏轨道卫星技术讨论会，确定了晨昏轨道卫星的载荷最终配置，包括中分辨率光谱成像仪（微光型）、微波温度计、微波湿度计、风场测量雷达、红外高光谱大气探测仪、全球导航卫星掩星探测仪、太阳辐射监测仪、太阳辐照度光谱仪、太阳XEUV成像仪、广角极光成像仪和空间环境仪器包。在《国家民用空间基础设施中长期发展规划（2015—2025年）》论证中，中国气象局积极将晨昏轨道卫星纳入规划。

在2015年10月发布的《国家民用空间基础设施中长期发展规划（2015—2025年）》中，大气观测卫星系列中明确提出了天气观测卫星星座通过光学、微波卫星组网，气候观测卫星星座由上午、下午和晨昏轨道卫星组成。

至此，我国2011—2025年气象卫星发展规划进一步满足了GOS 2025年远景规划，通过在风云三号任务中部署晨昏轨道卫星来使全球极地轨道卫星配置更加平衡，为全球观测系统做出了贡献。风云三号晨昏轨道卫星能大大提高和改进全球数值天气预报精度和时效，WMO理事会认为“中国的这一决定是全球天基观测系统的一项重大成就”。

2011年至今，我国先后于2013年、2017年成功发射了风云三号C上午星和风云三号D下午星。2021年7月5日，全球首颗民用晨昏轨道气象卫星风云三号E星成功发射，其降交点地方时为05:40，升交点地方

时为17:40。它与风云三号C星和D星实现了晨昏、上午、下午轨道卫星组网观测，4小时获取全球气象观测数据，为全球数值天气预报提供有力支撑^[22]。2016年和2021年发射的静止轨道气象卫星风云四号A星和B星，分别定点于105°E和133°E，首次在静止轨道卫星上装载了干涉式大气垂直探测仪。风云四号A星和计划于2024年发射的风云四号C星上均配有闪电成像仪。风云四号微波星也已立项。这些任务的实施，既是对我国气象卫星规划的有利执行，也最大限度满足了GOS 2025年远景发展规划，为全球观测系统做出了重要贡献(图3)。



图3 风云卫星2025年规划布局
Fig. 3 Layout of FengYun Satellites 2025 Planning

4 WIGOS 2040年发展远景与风云卫星未来发展规划

2019年，WMO发布了全球综合观测系统(WIGOS) 2040年远景规划。该规划是WMO的纲领性指导文件，预测了WMO在天气、气候、水和其他与环境相关的各项计划和活动中的气象服务领域发展需求、气象卫星观测需求、空间技术发展趋势，以及WMO全球综合观测系统在未来几十年的发展格局。WIGOS 2040年空间系统远景发展规划提出了4层体系结构，包括布局明确的业务骨干卫星系统、开放包容的业务骨干卫星观测支撑系统、业务开拓和科学技术示范系统、其他补充观测系统^[23]。其中，布局明确的业务骨干卫星系统，是最基本的业务卫星系统，具有确定的全球轨道布局和仪器配置，给出了在地球静止轨道圈、低轨道太阳同步极地轨道3个轨道平面(晨

昏/上午/下午)基本仪器配置，以及对其他基本观测要素和任务要求的仪器配置；开放包容的业务骨干卫星观测支撑系统，是业务骨干卫星系统的重要支撑，以一种更开放的方式来定义，即并不预先确定采用什么观测技术和轨道配置，以便及时囊括最新技术使其融入到骨干系统中；业务开拓和科学技术示范系统主要为2040年以后的业务骨干卫星系统的发展演进开拓道路，可以依托多元化平台，如使用小卫星验证和示范有关科学仪器或完成特定的科学任务，也可以作为卫星应急计划补充某个卫星仪器失效产生的空白；其他补充观测系统将鼓励和充分吸纳由WMO其他会员国和第三方贡献的卫星，以促进此类卫星系统对WMO会员国提供有价值的的数据，并对骨干系统进行补充和增强。WIGOS 2040年远景规划是我国未来风云气象卫星规划的重要参考文件之一。

风云卫星未来规划从卫星和地面应用方面进行了统筹设计。在气象卫星发展上,响应WIGOS 2040年空间系统远景规划,继续发展以地球静止轨道气象卫星和极地轨道气象卫星为主业务卫星的骨干业务卫星系统,并实现风云卫星升级换代;发展开放包容的业务骨干卫星观测支撑系统,与业务骨干卫星协同观测,形成组网观测和面向某种要素的特定观测能力,为业务骨干卫星提供必要补充。在应用能力上,强化应用基础支撑,进一步提升风云卫星在天气和数值预报、气候与气候变化、农业和生态气象、空间天气、行业气象、全球监测、数据共享等方面的能力。

风云卫星未来发展规划在考虑我国气象业务和科研发展需求的基础上,充分借鉴和吸收了WIGOS 2040年远景规划,在卫星规划、遥感仪器配置等方面均对WIGOS 2040年愿景做出响应,而WMO WIGOS 2040年愿景也为我国风云卫星未来远景发展规划提供了战略指导。

5 结语

对标WIGOS 2040年远景规划,风云卫星未来规划积极响应并有效支撑了业务骨干系统、业务骨干支撑系统两个层级的布局设计。风云卫星未来规划主要目标是确保长期、连续、稳定的全球观测能力,因此主要采用综合大卫星业务平台设计,这种设计优势主要有两点,一是平台综合性强,可以同时携带多台遥感仪器开展地球系统的综合观测;二是平台稳定可靠,可以确保业务卫星长期稳定开展高精度的定量观测。卫星的劣势是卫星的研发周期长,例如我国的风云三号A卫星、风云四号A卫星均经历了超过十年的技术研发,不能快速响应新的业务和研究需求,缺乏灵敏、机动、快速部署的能力。发展空间辐射测量技术,提高卫星定量观测的精度和稳定性是业务骨干系统、业务骨干支撑系统未来发展的技术趋势^[24-25]。

气象卫星的出现改变了气象学观测的方式,20世纪60年代出现并发展成熟的数值天气预报模式正在向地球系统模式发展,风云卫星未来规划缺少WIGOS 2040年远景规划第三层级业务开拓和科学技术示范系统和第四层级其他补充观测系统的支撑,不能全方位满足地球系统科学发展研究的需要。21世纪我国的航天事业快速发展,在已有气象卫星系列的基础上,形成了资源、海洋、环境、高分等多个系列卫星的快速发展^[26],这些为风云卫星的业务开拓和科学技术示范系统提供了广阔深厚的技术储备。在其他补充观测系统方面,未来空基对地观测的一个重要方向是将先进探测仪搭载在微小卫星(Cubesat)上,微小卫星成本

低、研制周期短,利用此类卫星组网是对未来风云卫星观测系统的有力补充。

新一代卫星观测系统设计和规划需要贯通观测需求、卫星和仪器指标任务要求、航天工业研制、天地一体化资料接收处理加工、资料应用的全部链条,是一项综合性强、复杂性高、涉及人员广的系统性工作。在全链条的设计规划任务中,观测系统模拟和评估^[27]是优化系统设计,最大化发挥卫星应用效益的重要环节,是我国新一代卫星观测系统设计和规划需要加强的一项工作。

在新一轮的风云卫星规划中,卫星资料应用设计必需与卫星研制同步开展,这是我国遥感卫星规划的短板。在卫星资料应用层面,我国气象卫星的遥感应用体系初步建立,国产卫星资料同化技术进步显著,风云卫星在国产数值天气预报模式中的资料同化量不断提高,风云卫星在天气分析、气候与气候变化,生态环境和自然灾害监测等方面正在从广度向深度发展^[28-29]。其中,天气分析是气象卫星的传统应用领域,气象卫星的出现使20世纪极大提高了预报员对天气尺度的监测和分析能力,但到目前为止对于百千米及其以下中小尺度天气系统的监测和分析能力有限,中小尺度天气系统生命周期短、发展演变快、局地致灾危害强,是新一轮风云卫星应用规划中需要重点关注的方向。高低轨卫星协同观测能力,云和气溶胶、大气成分、大气动力参数获取等也是新一轮风云卫星规划的重点。

自主可控的国产化道路和开放合作的国际化道路是风云卫星高质量发展的双翼,风云卫星已被纳入了全球业务应用气象卫星序列。未来风云卫星仍需积极参与全球气象观测体系建设,展示我国对地球大气、海洋、地表环境观测能力,巩固提升全球对地观测能力。坚持数据共享的开放政策,秉承义利相兼、以义为先的原则,务实推进气象卫星国际合作,并与“一带一路”等广大发展中国家开展多层面、多领域合作,为促进全球防灾减灾和气象事业发展贡献中国智慧。

致谢:国家卫星气象中心许健民院士对本文给予细致审阅,提出重要修改意见和建议,在此表示衷心感谢!

参考文献

- [1] Kidder S Q, Vonder Haar T H. Satellite meteorology: an introduction. San Diego: Academic Press, 1995.
- [2] 杨军,许健民,董超华.风云气象卫星40年:国际背景下的发展足迹.气象科技进展,2011,1(1): 6-14.
- [3] 卢乃锰,谷松岩.气象卫星发展回顾与展望.遥感学报,2016,

(下转79页)

- 技进展, 2014, 4(2): 24-35.
- [37] 杨文霞, 范皓, 杨洋, 等. 一次层状云降雨过程多源遥感特征参量演变分析. 气象, 2019, 45(9): 1278-1287.
- [38] 曹晓钟, 李峰, 张明. 德国气象局质量管理体系及林登伯格观象台建设简介. 气象科技合作动态, 2016, 增刊(3): 1-19.
- [39] Andrea L, Akio H, Felix A et al. A standardized atmospheric measurement data archive for distributed cloud and precipitation process-oriented observations in central Europe. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100: 1299-1314.
- [40] Jing P D, Michael B. et al. GPS Meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitation water. Journal of Applied Meteorology, 1996, 35(2): 830-838.
- [41] 徐桂荣, 孙振添, 李武阶, 等. 地基微波辐射计与GPS无线电探空和GPS/MET的观测对比分析. 暴雨灾害, 2010, 29(4): 315-321.
- [42] 敖雪, 王振会, 徐桂荣, 等. 微波辐射计亮温观测质量控制研究. 气象科学, 2013, 33(2): 130-137.
- [43] 王喆, 王振会, 曹晓钟. 毫米波雷达与无线电探空对云垂直结构探测的一致性分析. 气象学报, 2016, 74(5): 815-826.
- [44] 谢蕾, 刘黎平, 姚雯. 毫米波雷达与雨滴谱仪观测弱降水的对比分析. 成都信息工程大学学报, 2014, 29(1): 39-46.
- [45] 王德旺, 刘黎平, 仲凌志, 等. 毫米波雷达资料融化层亮带特征的分析及识别. 气象, 2012, 38(6): 712-721.
- [46] 吴举秀, 魏鸣, 王以琳. 利用毫米波测云雷达反演层状云中过冷水. 干旱气象, 2015, 33(2): 227-235.
- [47] 黄毅梅, 周毓荃, 杨敏. 利用3 mm云雷达资料分析混合相云垂直结构及过冷水分布. 高原气象, 2017, 36(1): 219-228.
- [48] Frisch A S, Feingold G, Fairall C W et al. On cloud radar and microwave radiometer measurements of stratus cloud liquid water profiles. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(D18): 23195-23197.
- [49] 彭亮, 陈洪滨, 李柏. 模糊逻辑法在3 mm云雷达反演云中水凝物粒子相态中的应用. 遥感技术与应用, 2011, 26(5): 655-663.
- [50] 杨晓, 黄兴友, 杨军, 等. 毫米波雷达云回波的自动分类技术研究. 2019, 77(3): 541-551.
- [51] 叶亮. 地基云图像的云状识别技术研究. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [52] 钟正宇, 马舒庆, 杨玲, 等. 结合风廓线雷达的毫米波衰减特性初步研究. 应用气象学报, 2018, 29(4): 496-504.
- [53] 周芯玉, 廖菲, 胡东明. 利用风廓线雷达对广东前汛期短时强降雨类暴雨过程低空风场特征的研究. 热带气象学报, 2019, 35(3): 332-342.
- [54] 黄俊, 廖碧婷, 王春林, 等. 新型垂直探测资料在污染天气分析中的应用. 中国环境科学, 2019, 39(1): 92-105.
- [55] 张镭. 大气边界层高度的地基遥感观测及其在中国的分布和趋势. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [56] 马秋杰, 李珍妮, 宋小全, 等. 基于多普勒测风激光雷达的低空急流观测研究. 海洋气象学报, 2019, 39(4): 61-67.
- [57] 张梦佳, 沈学顺, 何平, 等. 基于风廓线仪的华南地区夏季边界层湍流统计特征研究. 热带气象学报, 2018, 34(4): 535-545.
- [58] 曹云昌, 方宗义, 夏青. GPS遥感的大气可降水量与局地降水关系的初步分析. 应用气象学报, 2005, 16(1): 54-59.
- [59] Liljegren J C, Clothiaux E E, Mace G G et al. A new retrieval for cloud liquid water path using a ground-based microwave radiometer and measurements of cloud temperature. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D13): 14485-14500.
- [60] 唐仁茂, 李德俊, 向玉春, 等. 地基微波辐射计对咸宁一次冰雹天气过程的监测分析. 气象学报, 2012, 70(4): 806-813.
- [61] 杨波, 魏东. 二次开发风廓线探测资料及其在天气预报中的应用. 气象科技, 2010, 38(4): 413-417.
- [62] Sundstrom A M, Nousiainen T, Tuukka Petaja. On the quantitative low-level aerosol measurements using ceilometer-type lidar. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2009, 26: 2340-2351.
- [63] 张哲, 师宇, 王咏薇, 等. 基于风廓线雷达的对流边界层高度的确定. 气象科学, 2019, 39(3): 359-367.

(上接63页)

- 20(5): 832-841.
- [4] Eyer J R, Kelly G A, McNally A P, et al. Assimilation of TOVS radiance information through one-dimensional variational analysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1993, 119: 1427-1463.
- [5] 薛纪善. 气象卫星资料同化的科学问题与前景. 气象学报, 2009, 67(6): 903-911.
- [6] 方宗义, 许健民, 赵凤生. 中国气象卫星和卫星气象研究的回顾和发展. 气象学报, 2004, 62(5): 550-560.
- [7] 许健民, 杨军, 张志清, 等. 我国气象卫星的发展与应用. 气象, 2010, 6(7): 94-100.
- [8] 许健民, 郭强, 陆其峰, 等. 风云气象卫星数据处理算法的若干创新. 气象学报, 2014, 72(5): 1023-1038.
- [9] 张鹏, 咸迪, 柯玲. 观乎天文以察时变——探秘风云气象卫星. 自然资源科普与文化, 2021, 4: 4-11.
- [10] Zhang P, Lu Q F, Hu X Q, et al. Latest progress of the Chinese meteorological satellite program and core data processing technologies. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(9): 1027-1045.
- [11] Zhang P, Chen L, Xian D, et al. Recent progress of Fengyun meteorology satellites. Chinese Journal of Space Science, 2020, 40(5): 788-796.
- [12] 张文建. 世界气象组织综合观测系统(WIGOS). 气象, 2010, 36(3): 1-8.
- [13] 张鹏, 杨虎, 邱红, 等. 风云三号卫星的定量遥感应用能力. 气象科技进展, 2012, 2(4): 6-11.
- [14] 张鹏, 郭强, 陈博洋, 等. 我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9 卫星比较分析. 气象科技进展, 2016, 6(1): 72-75.
- [15] Zhang P, Zhu L, Tang S, et al. General comparison of FY-4A/AGRI with other GEO/LEO instruments and its potential and challenges in non-meteorological applications. Frontiers of Earth Science, 2019, 6: 224.
- [16] Lu Q F, Bell W, Bauer P, et al. An evaluation of FY-3A satellite data for numerical weather prediction. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137: 1298-1311.
- [17] Liao M, Healy S, Zhang P. Processing and quality control with FY-3C/GNOS data used in numerical weather prediction applications. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12: 2679-2692.
- [18] Xian D, Zhang P, Gao L, et al. Fengyun meteorological satellite products for earth system science applications. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(8): 1267-1284.
- [19] 国气象局. 我国气象卫星及其应用发展规划(2011—2020年). 北京: 中国气象局, 2012.
- [20] 谷松岩, 卢乃锰, 吴琼, 等. FY-3气象卫星降水探测能力分析与展望. 海洋气象学报, 2022, 42(2): 1-10.
- [21] 张鹏, 杨磊, 谷松岩, 等. 晨昏轨道卫星的气象应用需求分析. 气象科技进展, 2015, 5(2): 6-12.
- [22] Zhang P, Hu X Q, Lu Q F, et al. FY-3E: The first operational meteorological satellite mission in an early morning orbit. Advances in Atmospheric Sciences, 2022, 39(1): 1-8.
- [23] 张文建. 世界气象组织全球综合观测系统(WIGOS)空间部分2040年远景发展规划的解读. 气象科技进展, 2016, 6(1): 135-145.
- [24] Zhang P, Lu N, Li C, et al. Development of the Chinese space-based radiometric benchmark mission LIBRA. Remote Sensing, 2020, 12: 2179.
- [25] 卢乃锰, 丁雷, 郑小兵, 等. 中国空间辐射测量基准技术. 遥感学报, 2020, 24(6): 672-680.
- [26] 施建成, 郭华东, 董晓龙, 等. 中国空间地球科学发展现状及未来策略. 空间科学学报, 2021, 41(1): 95-117.
- [27] 李俊, 张鹏, 陈林, 等. 观测系统模拟和评估: 进展及展望. 气象科技进展, 2021, 11(3): 27-34.
- [28] Zhang P, Yang J, Wang J, et al. Preface to the special issue on Fengyun meteorological satellites: data, application and assessment. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(8): 1265-1266.
- [29] 许健民. 温带气旋和梅雨锋的卫星云图特征. 气象科技进展, 2021, 11(3): 14-26.